

تأثیر زبری در شیب‌های معکوس بر عمق ثانویه و نرخ استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی

ناهید پور عبدالله^{۱*}، تورج هنر^۱ و روح الله فتحی نافچی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۸/۱۶)

چکیده

تحقیقات بسیاری در خصوص پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر و سطوح صاف صورت گرفته اما تاکنون روی شیب‌های معکوس همراه با زبری‌های سطوح متفاوت تحقیقات کافی انجام نگردیده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر میزان زبری و شیب معکوس بر خصوصیات هیدرولیکی پرش و تغییرات افت انرژی در حوضچه آرامش با شیب کف منفی و سه نوع زبری متفاوت است. نتایج نشان داد که مقادیر عمق نسبی پرش در یک حوضچه آرامش با شیب کف منفی و افزایش زبری نسبت به حالت افقی کاهش پیدا می‌کند. این زبری‌ها در شرایط متفاوتی با اعداد فرود در محدوده بین ۴/۹ تا ۷/۸ مورد آزمایش قرار گرفتند. به‌طور متوسط کاهش اعماق نسبی در این تحقیق ۳۱/۱۵٪ می‌باشد. هم‌چنین مقدار افت انرژی نسبی در حالت‌های مختلف شیب و زبری بیشتر از حالت کلاسیک بود.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، شیب کف منفی، زبری سطوح، اعماق نسبی، افت نسبی پرش

۱. گروه آبیاری و زه‌کشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nahid7760@yahoo.com

مقدمه

انرژی پتانسیل ذخیره شده بالادست سدها در هنگام عبور آب از روی سرریز سدها به انرژی جنبشی تبدیل می‌گردد و نیروی هیدرودینامیکی زیادی را ایجاد می‌نماید. چنانچه این جریان با همان شدت وارد رودخانه یا کانال شود موجب فرسایش پایین دست در تاسیسات مربوطه می‌گردد و نهایتاً انهدام و خرابی سازه پایین دست را ایجاد خواهد نمود. لذا می‌بایست انرژی اضافی آب قبل از ورود به رودخانه مستهلک گردد. راه‌های متعددی از جمله ایجاد پرش هیدرولیکی برای مقابله با این انرژی وجود دارد. پرش هیدرولیکی پدیده‌ای است که در اثر تغییر جریان حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی رخ می‌دهد. حوضچه آرامش قسمت کوتاهی از یک آبراهه کف‌سازی شده است که می‌تواند پرش هیدرولیکی را مهار، طول پرش را کاهش داده و انرژی جنبشی آب را به انرژی حرارتی تبدیل نماید. از آنجایی که موضوع پرش در مسیر کانال‌ها و یا حوضچه‌های با شیب منفی هنوز در سطح وسیع مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته است. این موضوع می‌تواند در کاهش هزینه‌های اجرایی موثر باشد. به دلیل این که شیب منفی خود در مسیر به عنوان یک مانع عمل کرده و کاهش نسبت اعماق مزدوج و کاهش طول پرش و نیز افزایش راندمان اتلاف انرژی نسبت به حالت افقی گشته و نهایتاً با توجه به نتایج حاصل امکان، ساخت حوضچه‌ای کوتاه‌تر و با ارتفاع دیواره‌های کمتر را ممکن می‌سازد. تثبیت پرش روی شیب‌های منفی کارایی این گونه کانال‌ها یا حوضچه‌ها را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. یک روش مناسب ایجاد زبری در مسیر جریان می‌باشد. این گونه زبری علاوه بر این که پرش را در موقعیت مورد نظر تثبیت می‌نماید باعث کاهش طول پرش نیز می‌شود.

راجاراتنام (۱۱) اولین مطالعات سینماتیک را در خصوص پرش‌های روی بستر زبر انجام داد. او برای بیان زبری پارامتری به نام پارامتر زبری $k = \frac{k_e}{y_1}$ که در آن k_e ارتفاع معادل زبری

و D_1 جریان ورودی در بالای زبری‌هاست را معرفی نمود. وی با توجه به آزمایش‌های مختلف روی ۵ زبری مختلف با مقادیر زبری نسبی ۰/۰۲ تا ۰/۴۳ و اعداد فرود ۳ تا ۱۰ نشان داد که $\frac{D_2}{D_1}$ تابعی از Fr_1 و زبری نسبی است و نتایج زیر حاصل شد:

برای زبری‌ها نسبی (۰/۰۲۱ تا ۰/۰۳۱) $0.03 \approx$

$$J = \frac{D_2}{D_1} = 1/3 Fr_1 - 0/3 \quad [1]$$

برای زبری‌ها نسبی (۰/۰۵۱ تا ۰/۱۱۵) $0.08 \approx$

$$J = \frac{D_2}{D_1} = 1/22 Fr_1 - 0/24 \quad [2]$$

برای زبری‌ها نسبی (۰/۱۶۵ تا ۰/۴۲۵) $0.29 \approx$

$$J = \frac{D_2}{D_1} = 1/18 Fr_1 - 0/1 \quad [3]$$

خدر و راجگوپال (۹) عنوان کردند که افت انرژی حاصل از پرش در بسترهایی با شیب منفی تفاوت چندانی با پرش کلاسیک ندارد. آنها حداکثر افت انرژی را در کارهای خود بین ۷۰ تا ۸۰ درصد گزارش کردند.

هاگر و برترز (۷) با استفاده از اصل مقدار حرکت، روابطی برای پرش هیدرولیکی در کانال‌های افقی مستطیلی با پله‌های مثبت یا منفی به دست آورده، نشان دادند که اطلاعات و نتایج آزمایشگاهی نیز با معادلات مربوطه تطابق خوبی دارند و لذا برای هر مقدار Fr_1 ، D_1 و S (ارتفاع پله) می‌توان عمق ثانویه D_2 را به دست آورد.

پالگیرا (۱۰) با استفاده از دریچه کشویی در حوضچه‌ای به طول ۲ متر، عرض ۰/۴ متر و در شیب‌های منفی ۵، ۱۵، ۱۰ و ۲۰ درصد پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند. دبی بکار رفته در کار آنها بین ۲۵ الی ۷۴ لیتر بر ثانیه بود و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی رابطه بین G و Fr_1 را که تابعی از شیب بستر (i) ارائه نمودند.

$$G = 3/22^{0.01} Fr_1 \quad -0.25 < i < 0 \quad [4]$$

$$D = 0/5(-1 + \sqrt{1 + 18G^2}) \quad [5]$$

توکای (۱۲) اثرات بستر موج دار را روی پرش هیدرولیکی به

مزدوج پرش ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. آنها رابطه بین تغییرات عمق ثانویه به عمق اولیه (D_2/D_1) و عدد فرود در بستر موج دار با استفاده از رگرسیون خطی بررسی نموده و رابطه ۱۰ با ضریب هم‌بستگی ۰/۹۱ به‌دست آوردند.

$$\frac{D_2}{D_1} = 1/047Fr_1 + 0/5902 \quad [10]$$

مطالعات عباسپور و همکاران (۳) روی زبری‌های سینوسی شکل نشان داد که برای یک عمق فوق بحرانی، عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود $3/6 \leq Fr_1 \leq 8/6$ و برای شش شیب موج مختلف در محدوده $0/286 \leq t/s \leq 0/625$ حدود ۵-۲۶ درصد کوچک‌تر از بسترهای صاف است.

السبایه و شبایک (۶) یک مطالعه آزمایشگاهی در محدوده عدد فرود ۳ تا ۷/۵ روی پنج نوع بستر زبر شامل زبری‌های سینوسی، مثلثی، دوزنقه‌ای با دو شیب متفاوت و مستطیلی انجام دادند. نتایج بیانگر کاهش قابل توجه طول و عمق ثانویه پرش روی بستر زبر در مقایسه با پرش روی بستر صاف بوده و رابطه کلی را برای عمق نسبی پرش هیدرولیکی روی بستر زبر ارائه نمودند.

نیسی و شفافی بجزستان (۱) نشان دادند که زبری‌های لوزی شکل می‌توانند عمق متناوب پرش را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند. این میزان کاهش برای اعداد فرود مختلف است به‌طوری‌که حداقل ۱۸ درصد و حداکثر ۳۱ درصد و به‌طور متوسط ۲۴/۲ درصد کاهش در عمق متناوب پرش حاصل می‌شود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز در فلومی به طول ۱۵ متر، عرض ۰/۷ متر و ارتفاع ۰/۶ متر با دیوارهای شفاف صورت گرفت (شکل ۱). به منظور افزایش عدد فرود اولیه در ۲ متر از طول کانال (قبل از دریچه بالادست) ارتفاع ۰/۶ متر به ۱/۱ متر افزایش یافت. به منظور ایجاد پرش

صورت تجربی بررسی نمود. شیب موج t/s برابر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۲۶ بوده و مطالعات در محدوده اعداد فرود ۵ تا ۱۲ انجام گرفت. در این تحقیق تغییرات عمق ثانویه به عمق اولیه (D_2/D_1) به صورت تابعی از عدد فرود اولیه طبق رابطه ۶ نشان داده شده است.

$$\frac{D_2}{D_1} = 1/1223Fr_1 + 0/0365 \quad [6]$$

بیرامی و چمانی (۴) در آزمایش‌های خود روی شیب‌های صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۰/۱ و به این نتیجه رسید که اجزای نیروی ثقل در پرش مخالف با جهت گردش جریان است، سطح آب از سطح غلطان موجدار و ناپایدار شروع می‌شود. پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس تقریباً غیر قابل کنترل است. آنالیز داده‌ها نشان داد که شیب منفی از کاهش اساسی تابع نسبت عمق و شیب مثبت افزایش تابع نسبت عمق را می‌دهد.

کارولو و فرو (۵) نشان دادند که زبری‌ها می‌توانند ضریب عدد فرود اولیه در معادله ۷ را کاهش دهند و این ضریب به ارتفاع زبری‌ها (قطر متوسط زبری‌ها) وابسته است.

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8 Fr_1^2} \right) \quad [7]$$

آنها با انجام آزمایش‌هایی تأثیر زبری‌های طبیعی شن و قلوه سنگ با پنج قطر متوسط در محدوده ۴/۶ تا ۳۲/۰ میلی‌متر مطالعه کرده و روابط ۸ و ۹ را برای عمق مزدوج ارائه دادند.

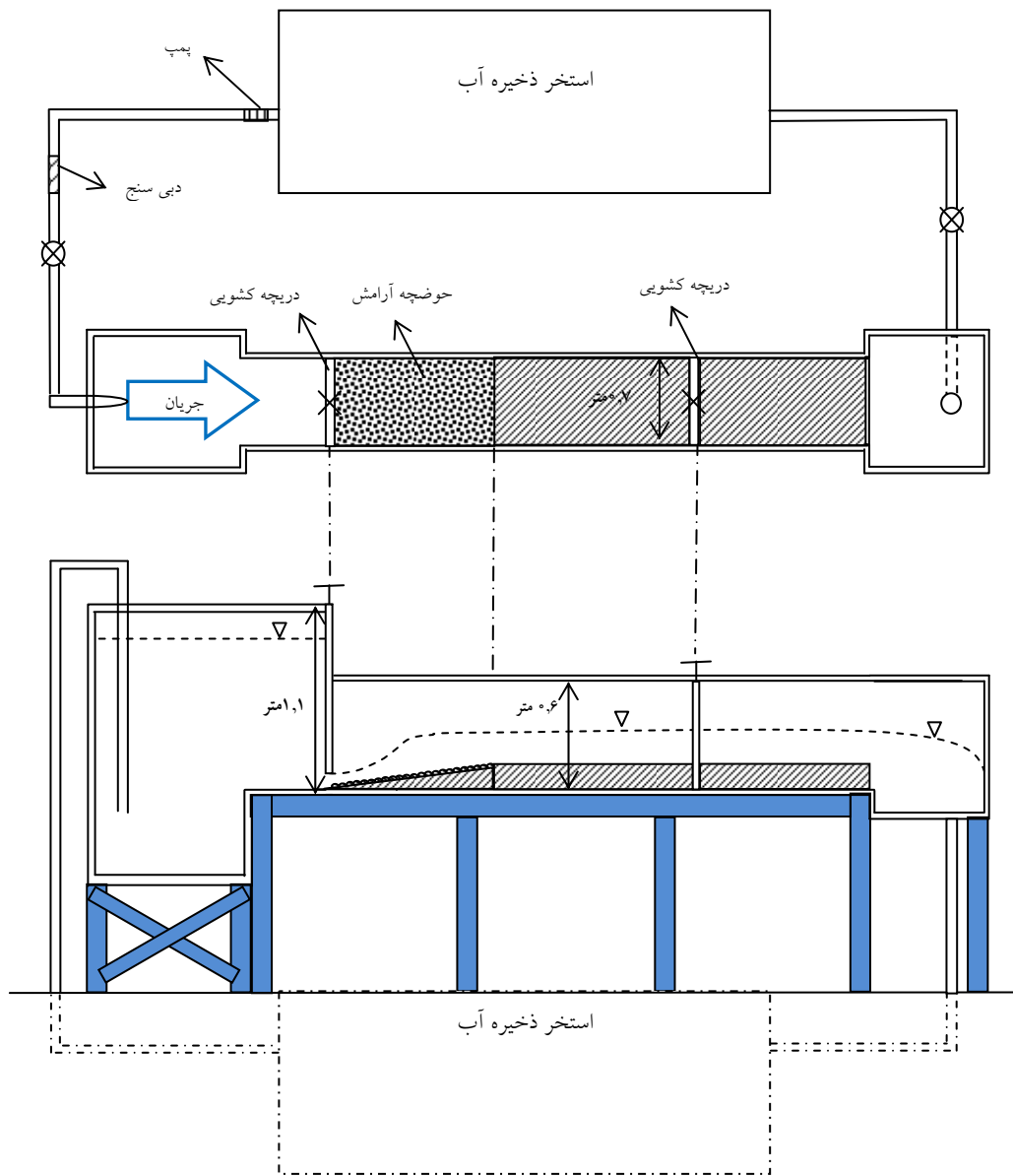
$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8(1-\gamma) Fr_1^2} \right) \quad [8]$$

در این معادله مقدار ضریب γ را پس از انجام آزمایش‌ها به شرح زیر استخراج کردند:

$$\gamma = \frac{2}{\pi} \arctg \left(0/8 \left(\frac{k_s}{D_1} \right)^{0/75} \right), R^2 = 0/71 \quad [9]$$

در این رابطه k_s ارتفاع متوسط زبری‌ها و D_1 عمق قبل از پرش است.

ایزدجو و شفافی بجزستان (۸) نشان دادند که تأثیر زبری‌های موجی شکل با مقطع دوزنقه طول پرش ۵۰ درصد و عمق



شکل ۱. پلان و پروفیل طولی فلوم مورد استفاده

شیب در حوضچه آرامش صورت گرفت. در این تحقیق تصمیم گرفته شد که مراحل آزمایشگاهی در ۳ زبری ۱،۴ و ۱۰ میلی‌متر انجام شود. در هر مرحله این زبری‌ها به وسیله چسب بر روی صفحه فلزی ریخته می‌شد و پس از خشک شدن درون کانال قرار می‌گرفت و سپس صفحه فلزی به وسیله چسب آکواریوم به کانال چسبانده می‌شد تا با فشار آب جدا نگردد. برای انجام این مطالعه ۱۴۴ آزمایش در محدوده اعداد فرود $4/9$ تا $7/8$ انجام شده است.

از دریچه کشویی که در فاصله ۲ متری از منبع ورودی و به منظور تثبیت پرش از دریچه‌ای کشویی دیگری که در فاصله ۵ متری از دریچه ابتدایی قرار داشت، استفاده گردید. پرش هیدرولیکی پس از باز نمودن دریچه اول، با تغییر میزان بازشدگی دریچه ایجاد و با استفاده از دریچه دوم در موقعیت دلخواه تثبیت می‌شد. برای تغییر شیب حوضچه آرامش در زیر آن تسمه‌های فلزی متناسب با شیب مورد نظر جوش داده شد. با استفاده از این تسمه‌ها که دارای ارتفاع متفاوتی بودند تغییر

نتایج و بحث

دامنه متغیرهای این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است.

نسبت اعماق مزدوج

اگر D_1 عمق فوق بحرانی پرش بر روی بستر زبر و u_1 سرعت متوسط در مقطع اولیه پرش و D_2 عمق مزدوج پرش باشد، بنابراین D_2 را می‌توان بعنوان تابعی از پارامترهای زیر نوشت:

$$D_2 = f(D_1, u_1, g, \mu, \rho, t, \theta) \quad [11]$$

در این رابطه: g شتاب ثقل، ρ دانسیته، μ لزجت دینامیکی آب، t قطر زبری، ν لزجت سینماتیکی و θ شیب زاویه است. بنابراین با توجه به تئوری باکینگهام نسبت اعماق مزدوج به-عنوان تابعی از اعداد بدون بعد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{D_2}{D_1} = f_1\left(\text{Re} = \frac{u_1 D_1}{\nu}, Fr = \frac{u_1}{\sqrt{g D_1}}, \frac{t}{D_1}, \theta\right) \quad [12]$$

در این مطالعه مقدار عدد رینولدز در محدوده $10^4 \times 3/6$ تا $10^4 \times 9/7$ متغیر بود که بیانگر جریان آشفتته است، بنابراین می‌توان از اثر لزجت صرف‌نظر نمود و معادله ۱۳ به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{D_2}{D_1} = f_2\left(Fr_1, \frac{t}{D_1}, \theta\right) \quad [13]$$

نتایج حاصل از اندازه‌گیری اعماق مزدوج پرش در آزمایشات انجام شده در این تحقیق روی بسترهای زبر با شیب معکوس در شکل ۲ ترسیم شده است. با توجه به این شکل‌ها و با در نظر گرفتن $\frac{D_2}{D_1}$ به عنوان متغیر وابسته و Fr_1 و $\frac{t}{D_1}$ و $\tan \theta$ به عنوان متغیرهای مستقل، تحلیل رگرسیون انجام شد. این تحلیل نشان داد در این حالت در محدوده اعداد فرود $4/9$ تا $7/8$ و شیب صفر تا -2 ٪ معادله برازش داده شده به صورت زیر است:

$$\frac{D_2}{D_1} = 1/39 Fr_1 - 6/018 \frac{t}{D_1} - 0/87 \tan \theta \quad [14]$$

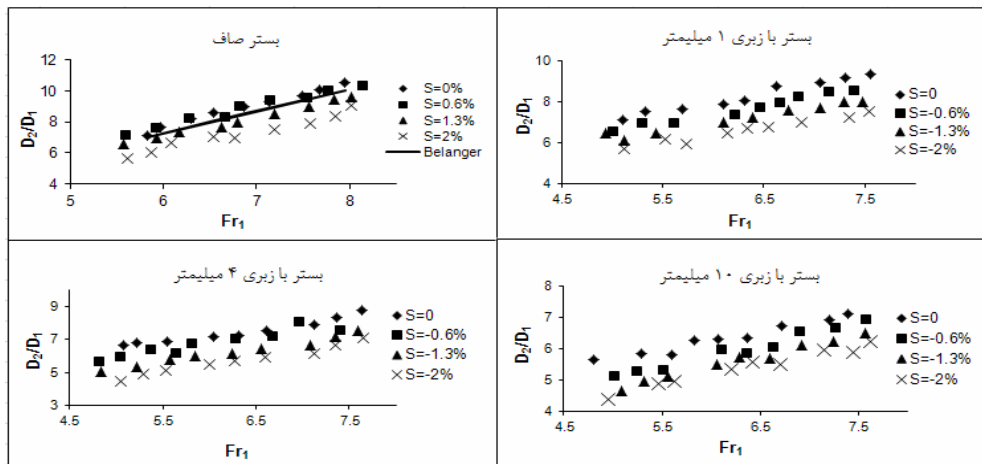
$R^2 = 0/993$
همان‌طور که در شکل ۲ و جدول ۲ مشاهده می‌شود با قرار دادن زبری بر روی شیب‌های مختلف نسبت اعماق مزدوج

کاهش یافته است، به طوری‌که در هر شیب منفی با افزایش زبری این نسبت بیشتر کاهش می‌یابد. این مطلب را می‌توان به صورت مشابه برای ثابت در نظر گرفتن زبری و افزایش شیب منفی نیز بیان کرد. با توجه به اثر کاهشی هر یک از متغیرهای شیب و زبری روی نسبت اعماق مزدوج می‌توان نتیجه گرفت اثر متقابل این دو بر روی نسبت اعماق مزدوج نیز کاهشی است. همان‌گونه که انتظار می‌رود در این تحقیق بیشترین کاهش اعماق نسبی مربوط به زبری 10 میلی‌متر با شیب حداکثر 2 ٪ می‌باشد. بر اساس جدول ۲ درصد کاهش D_2 در این تحقیق در محدوده فرود اولیه $4/95$ تا $7/65$ معادل $12/31$ درصد می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود هر چه درصد شیب و میزان زبری افزایش پیدا نماید درصد کاهش اعماق نسبی نیز افزایش پیدا کرده است. به‌طور متوسط کاهش اعماق نسبی در این تحقیق $31/15$ ٪ می‌باشد. این مقدار در تحقیق نیسی و شفافی بجزستان (۱) در بستر با زبری لوزی شکل برابر $24/2$ ٪، کاظم‌زاده و همکاران (۲) در تأثیر آرایش زبری کاهش اعماق مزدوج را $24/4$ ٪، ایزدجو و شفافی بجزستان (۸) در زبری‌های موجی کاهش 30 ٪ را بیان نمودند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در حوضچه آرامش همراه با شیب کف منفی و زبری‌های مختلف کاهش اعماق نسبی بیشتر بوده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود نسبت اعماق مزدوج در مقایسه با نتایج خدر (۹) و پالگیرا (۱۰) در شیب 2 ٪- کمتر می‌باشد. و با افزایش زبری این کاهش نسبت به نتایج خدر (۹) و پالگیرا (۱۰) شدیدتر شده است. که نشان‌دهنده تأثیر مضاعف زبری‌های مختلف می‌باشد. هم‌چنین هم‌بستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و معادله ۱۴ در شکل ۴ نشان داده شده است.

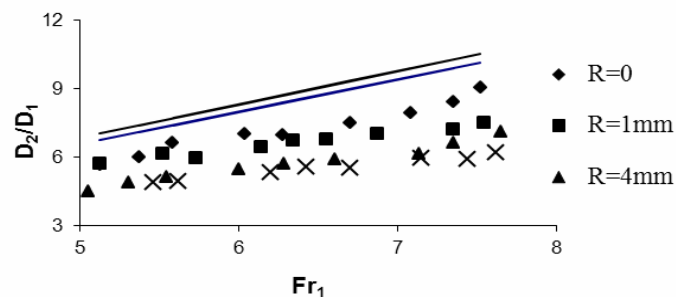
مقدار ضریب γ یا ضریب کاهش اعماق مزدوج را می‌توان از معادله ۹ با به کار بردن داده‌های آزمایشگاهی محاسبه نمود. مقدار ضریب γ با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها روی شیب‌های منفی مختلف و زبری متفاوت از حدود $0/18$ تا $0/57$ متغیر است. این ضریب کاهشی در محدوده عدد فرود $4/95$ تا $7/5$ به‌طور متوسط $0/37$ به‌دست آمد که در مقایسه با حالت

جدول ۱. دامنه متغیرها

متغیرها	دامنه متغیرها
عدد فرود اولیه	۴/۹-۷/۸
دبی (لیتر بر ثانیه)	۴۰-۵۰
عمق اولیه پرش (سانتی متر)	۱/۷-۳/۷
ارتفاع زبری (میلی متر)	۱، ۴، ۱۰



شکل ۲. نسبت D_2/D_1 در برابر Fr_1 برای بستر صاف و انواع زبری و شیب منفی



شکل ۳. نسبت D_2/D_1 در برابر Fr_1 برای شیب منفی ۲٪ و انواع زبری

کلاسیک کاهش می‌دهد. با در نظر گرفتن متغیرهای مؤثر بر طول پرش و با استفاده از تکنیک آنالیز ابعادی و بر اساس تئوری قضیه باکینگهام خواهیم داشت:

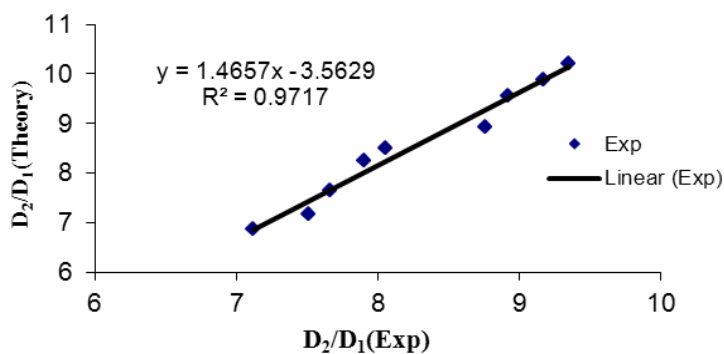
$$\frac{L_j}{D_1} = f_j(\text{Re}, Fr_1, \frac{t}{D_1}, \theta) \quad [15]$$

کلاسیک ($\gamma = 0$) قابل ملاحظه است. این مقدار در تحقیق نیسی و شفافی بجزستان (۱) به طور متوسط ۰/۴ و در کاظم زاده و همکاران (۲) برابر ۰/۳۸ گزارش شده است.

همچنین نتایج این تحقیق آزمایشگاهی نشان داد که زبری بستر همراه با شیب کف منفی، طول پرش را نسبت به حالت

جدول ۲. درصد کاهش D_2 برای انواع زبری و شیب منفی

نوع بستر و شیب منفی	درصد کاهش اعماق نسبی	درصد کاهش D_2
بدون زبری و شیب صفر	۰	۰
بدون زبری و شیب $-۰/۶\%$	۹/۶	۲/۵
بدون زبری و شیب $-۱/۳\%$	۱۷/۴	۳/۳
بدون زبری و شیب -۲%	۲۶/۴	۹/۸
زبری ۱ میلی‌متر و شیب صفر	۱۵/۹	۲/۸
زبری ۱ میلی‌متر و شیب $-۰/۶\%$	۲۱/۹	۵/۷
زبری ۱ میلی‌متر و شیب $-۱/۳\%$	۳۸	۱۰/۵
زبری ۱ میلی‌متر و شیب -۲%	۴۲/۱	۱۵/۰
زبری ۴ میلی‌متر و شیب صفر	۲۴/۱	۱۲/۶
زبری ۴ میلی‌متر و شیب $-۰/۶\%$	۳۱	۱۳/۱
زبری ۴ میلی‌متر و شیب $-۱/۳\%$	۳۶/۸	۱۵/۵
زبری ۴ میلی‌متر و شیب -۲%	۴۱/۸	۲۱/۱
زبری ۱۰ میلی‌متر و شیب صفر	۳۵/۵	۱۳/۲
زبری ۱۰ میلی‌متر و شیب $-۰/۶\%$	۳۸/۹	۱۷/۸
زبری ۱۰ میلی‌متر و شیب $-۱/۳\%$	۴۲/۹	۱۹/۱
زبری ۱۰ میلی‌متر و شیب -۲%	۴۴/۹	۲۲/۳



شکل ۴. مقایسه اعماق نسبی پرش تئوری و آزمایشگاهی

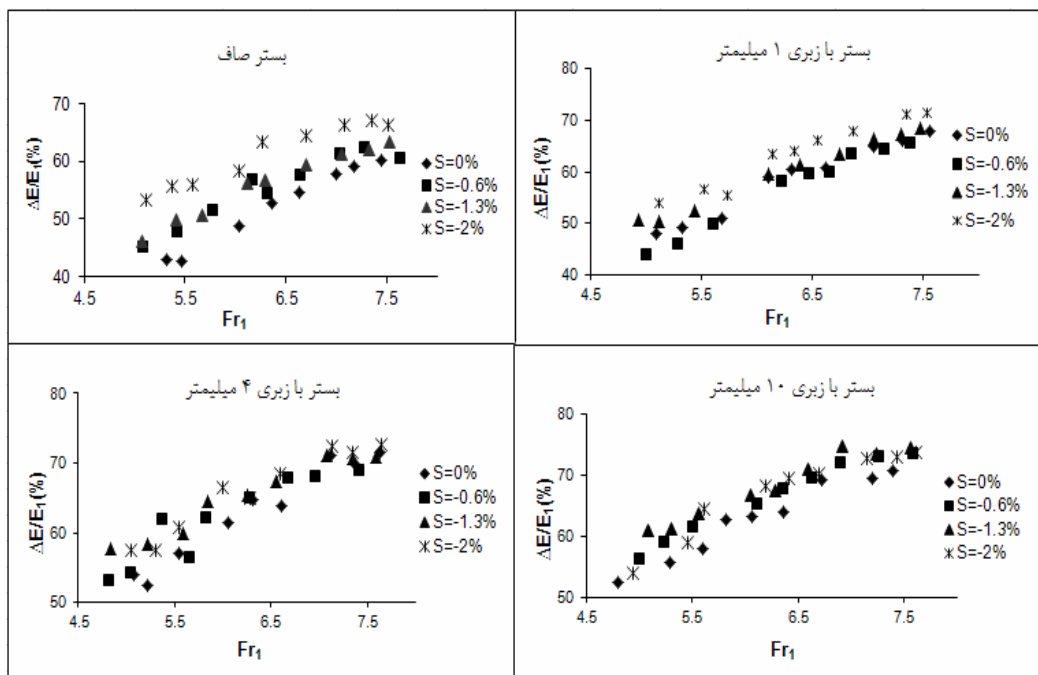
در این تحقیق به‌طور متوسط کاهش طول پرش $۳۹/۶$ درصد بوده است. هم‌چنین بیشترین کاهش طول پرش مربوط به زبری ۱۰ میلی‌متر و شیب کف منفی ۲% بود. طول غلتاب پرش هیدرولیکی نیز نسبت به حالت کلاسیک در این تحقیق به‌طور متوسط $۳۲/۳$ درصد کاهش یافت.

با استفاده از نرم افزار SPSS و در نظر گرفتن $\left(\frac{L_j}{D_1}\right)$ به عنوان متغیر وابسته و $\frac{t}{D_1}$ ، Fr_1 و $\tan \theta$ به عنوان متغیرهای مستقل، معادله برازش داده شده به صورت زیر حاصل شد:

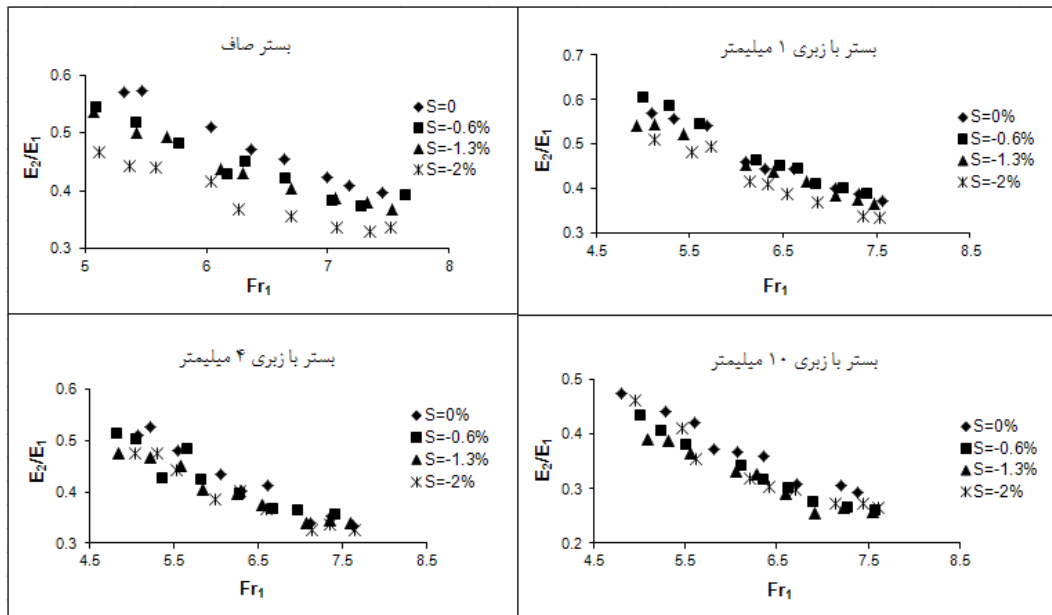
$$\frac{L_j}{D_1} = -۳۶/۷۵ \frac{t}{D_1} + ۸/۳۶ Fr_1 - ۱۱/۲ \tan \theta \quad R^2 = ۰/۹۸ \quad [۱۶]$$

جدول ۳. معادلات به دست آمده برای پارامتر نسبت $\Delta E/E_1$ در انواع زبری و شیب

درصد افزایش ΔE	R^2	معادله	زبری (R) و شیب منفی (S)
...	0/99	$\Delta E/E_1 = 55.114 \ln(Fr_1) - 49.87$	$S=0, R=0$
9	0/93	$\Delta E/E_1 = 42.739 \ln(Fr_1) - 23.307$	$S=-0.6\%, R=0$
11	0/98	$\Delta E/E_1 = 43/177 \ln(Fr_1) - 23/263$	$S=-1/3\%, R=0$
21	0/95	$\Delta E/E_1 = 37/143 \ln(Fr_1) - 7/02$	$S=-2\%, R=0$
15/5	0/96	$\Delta E/E_1 = 52/907 \ln(Fr_1) - 38/65$	$S=0, R=1\text{mm}$
12/3	0/98	$\Delta E/E_1 = 58/996 \ln(Fr_1) - 50/938$	$S=-0/6\%, R=1\text{mm}$
18/3	0/98	$\Delta E/E_1 = 45/933 \ln(Fr_1) - 23/857$	$S=-1/3\%, R=1\text{mm}$
24/9	0/95	$\Delta E/E_1 = 50/245 \ln(Fr_1) - 29/113$	$S=-2\%, R=1\text{mm}$
23/9	0/96	$\Delta E/E_1 = 47/582 \ln(Fr_1) - 24/43$	$S=0, R=4\text{mm}$
22/5	0/87	$\Delta E/E_1 = 38/863 \ln(Fr_1) - 7/06$	$S=-0/6\%, R=4\text{mm}$
28/3	0/95	$\Delta E/E_1 = 33/891 \ln(Fr_1) + 3/35$	$S=-1/3\%, R=4\text{mm}$
29/6	0/95	$\Delta E/E_1 = 39/805 \ln(Fr_1) - 7/23$	$S=-2\%, R=4\text{mm}$
23/8	0/96	$\Delta E/E_1 = 44/023 \ln(Fr_1) - 16/641$	$S=0, R=10\text{mm}$
31/3	0/98	$\Delta E/E_1 = 42/861 \ln(Fr_1) - 11/69$	$S=-0/6\%, R=10\text{mm}$
32/3	0/95	$\Delta E/E_1 = 38/465 \ln(Fr_1) - 2/248$	$S=-1/3\%, R=10\text{mm}$
34/3	0/92	$\Delta E/E_1 = 44/102 \ln(Fr_1) - 14/235$	$S=-2\%, R=10\text{mm}$



شکل ۵. تغییرات افت نسبی پرش در بستر صاف، شیب‌های منفی و زبری‌های مختلف



شکل ۶. مقادیر E_2/E_1 نسبت به Fr_1 برای زبری‌ها و شیب‌های منفی مختلف

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌توان رابطه بین $\Delta E/E_1$ بر حسب Fr_1 ، t/D_1 و $\tan \theta$ را به صورت زیر ارائه نمود:

$$\Delta E/E_1 = 8/668 Fr_1 - 30/408 t/D_1 + 11/36 \tan \theta \quad [18]$$

$$R^2 = 0.997$$

شکل ۶ تغییرات E_2/E_1 نسبت به Fr_1 را نشان می‌دهد همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش فرود اولیه نسبت E_2/E_1 کاهش می‌یابد و با افزایش شیب منفی این نسبت کمتر شده است. هم‌چنین با افزایش زبری نسبت E_2/E_1 ، نسبت به حالت صاف کمتر شده است.

جدول ۳ معادلات استخراج شده به منظور بررسی تأثیر هر آرایش زبری بستر روی افت نسبی انرژی، را نشان می‌دهد. در این جدول ۳ دیده می‌شود که بیشترین درصد افزایش ΔE مربوط به زبری ۱ سانتی‌متر با شیب ۲-٪ می‌باشد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که زبری بستر همراه با شیب منفی تأثیر مثبتی در کنترل پرش هیدرولیکی دارد. بنابراین می‌توان به جای صرف هزینه‌های گزاف برای ساخت حوضچه‌های آرامش ساده از بستر زبر همراه با شیب منفی استفاده نمود.

اتلاف انرژی

به‌منظور بررسی تأثیر شیب منفی و زبری بر نرخ اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی در مقایسه با پرش روی بسترهای صاف و افقی منحنی تغییرات افت نسبی انرژی ($\Delta E/E_1$) در مقابل عدد فرود اولیه برای هر زبری و شیب در شکل ۵ ترسیم گردید. این منحنی‌ها نشان می‌دهد در هر زبری با افزایش شیب تغییرات افت نسبی انرژی با افزایش عدد فرود اولیه افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش زبری این تغییرات بیشتر می‌شود که نشان دهنده تأثیر زبری و شیب منفی در افزایش افت نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به حالت کلاسیک می‌باشد و به ازای یک فرود یکسان اتلاف انرژی در بستر با زبری و شیب‌های مختلف بیشتر از بستر با زبری بدون شیب است. که با نتایج گزارش شده توسط توکیای (۱۲) و عباسپور و همکاران (۳) مطابقت دارد.

افت نسبی انرژی در پرش کلاسیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta E/E_1 = 1 - E_2/E_1 \quad [17]$$

که در آن انرژی در مقطع اولیه، E_1 انرژی در مقطع ثانویه است.

نتیجه گیری

مقادیر عمق نسبی پرش در یک حوضچه آرامش با شیب کف منفی و زبری نسبت به حالت افقی کاهش پیدا می کند. با افزایش شیب معکوس و اندازه زبری ها این کاهش بیشتر شده است. به طوری که بیشترین کاهش مربوط به زبری ۱۰ میلی متر و شیب منفی ۲٪ می باشد. متوسط کاهش نسبت اعماق نسبی در محدوده آزمایشات انجام شده در این تحقیق ۳۱/۱۵٪ می باشد. هر چه درصد شیب و میزان زبری افزایش یابد درصد

کاهش D_2 نیز افزایش پیدا می کند. در این تحقیق در محدوده فرود اولیه ۴/۹۵ تا ۷/۶۵ کاهش D_2 ، ۱۲/۳۱ درصد محاسبه گردید. همچنین مقدار افت انرژی نسبی در حالت های مختلف شیب و زبری بیشتر از حالت کلاسیک بود. با افزایش شیب و اندازه زبری مقدار افت انرژی نسبی نیز افزایش یافت به طور متوسط مقدار افت انرژی نسبی در حالت شیب منفی و زبری در محدوده فرود اولیه ۴/۹۵ تا ۷/۶۵ حدود ۲۱٪ بیشتر از حالت کلاسیک بود.

منابع مورد استفاده

۱. نیسی، ک. و م. شفاعی بجزستان. ۱۳۸۸. بررسی اثر زبری های لوزی شکل بر عمق متناوب پرش هیدرولیکی. هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.
۲. کاظمیان زاده، ا. ک. الله دادی و م. شفاعی بجزستان. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه های آرامش. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب تبریز.
3. Abaspour, A. and D. Hosseinzadeh. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. J. Appl. Sci. 9(11): 2045-2055.
4. Berami, M. K. and R. Chamani. 2006. Hydraulic jump in sloping channel: Sequent depth ratio. J. Eng. DOI: 10.1061/_ASCE_0733-9429_2006_132:10_1061.
5. Carollo, F.G. and V. Ferro. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. J. Hydraul. Eng. 133(9): 989-999.
6. Elsebaie, I. H. and SH. Shabayek. 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. Civil & Environ. Eng. IJCEE-IJENS. 10(1): 40-50.
7. Hager, W.H. and N.V. Bretz. 1986. Hydraulic jumps at positive and negative steps. J. Hydraul. Res. 24(4): 237-252.
8. Izadjoo, F. and M. Shafai Bejestan. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. J. Appl. Sci. 7(8): 1164-1169.
9. Khaddar, M. H.A. and S. Rajagopal. 1972. Hydraulic jump in adverse channel slopes. Irrig. and Power 29:77-82.
10. Pagliara, S. 2000. Limiting and sill-controlled adverse-slope hydraulic jump. J. Hydraul. Eng. 126(11): 847-851.
11. Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. Trans. Eng. Inst. Canada 11:1-8.
12. Tokyay, N. D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. EWRI. Water & Environ. Resour. Cong., Anchorage, Alaska, USA.